

Una contribución al diseño automático de presas bóveda^(*)

Por JOAQUIN DIEZ-CASCON SAGRADO
 AVELINO SAMARTIN QUIROGA
 JULIAN DIAZ DEL VALLE

Departamento de Análisis de Estructuras
 E.T.S. Ingenieros de Caminos C. y P. (Santander)

Las presas bóveda constituyen uno de los tipos estructurales más interesantes desde el punto de vista del diseño ingenieril. Se presenta a continuación un método de cálculo mediante ordenador que permite definir genéticamente la bóveda, es decir, la forma de su superficie media, representada por una expresión analítica o numérica y por la ley de espesores, analizándose tensionalmente la forma obtenida.

1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

El problema de la optimización en el diseño de presas de bóveda, planteado en toda la generalidad, corresponde a la definición de este diseño, es decir, de los siguientes parámetros de la presa bóveda:

1. Forma.
2. Altura.
3. Localización.
4. Propiedades de los materiales de construcción.
5. Procedimiento de construcción.
6. Tratamiento de la cimentación y juntas con el terreno.
7. Localización y tipo de obras secundarias (aliviadero, galerías, etc.).
8. Uso de armado o pretensado.

de modo que se minimice una cierta función mérito, que exprese el coste de la estructura en función de estos parámetros (**).

Este es el planteamiento general, pero evidentemente es de todo punto inabordable, en el estado actual de la técnica.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre de 1983.

(**) Ronald Sharpe planteó el problema de la optimización de presas bóveda con una serie de limitaciones, y lo resolvió por el método de cuasilinearización, ver publicación (1).

En este artículo, sólo se trata de definir geoméricamente la bóveda; es decir, la forma de su superficie media, representada por una expresión analítica o numérica y por la ley de espesores. La función mérito se reduce, asimismo, a una que dependa exclusivamente del volumen de hormigón.

Una primera etapa en la optimización de las presas bóveda corresponde al diseño asistido mediante computador de la estructura, es decir, a la obtención de una geometría que satisfaga los condicionamientos impuestos (criterios de diseño), es decir, que sea una solución válida o admisible pero que no necesariamente represente la presa óptima.

La idea fundamental que se utiliza corresponde a proyectar la presa como una superficie antifunicular de las cargas mantenidas o predominantes (peso propio más presión hidrostática). De este modo, se utiliza el material de la presa, el hormigón, del modo más racional y económico posible —a compresión— y evitando al máximo las flexiones.

El proceso de diseño asistido mediante computador de presas bóveda que se presenta, es esencialmente iterativo y realimentado, de modo que, cambiando en sucesivas etapas (iteraciones) los espesores y, por tanto, su forma, se alcance una que satisfaga los requerimientos impuestos en los criterios de diseño previamente establecidos. Este proceso de diseño, que se

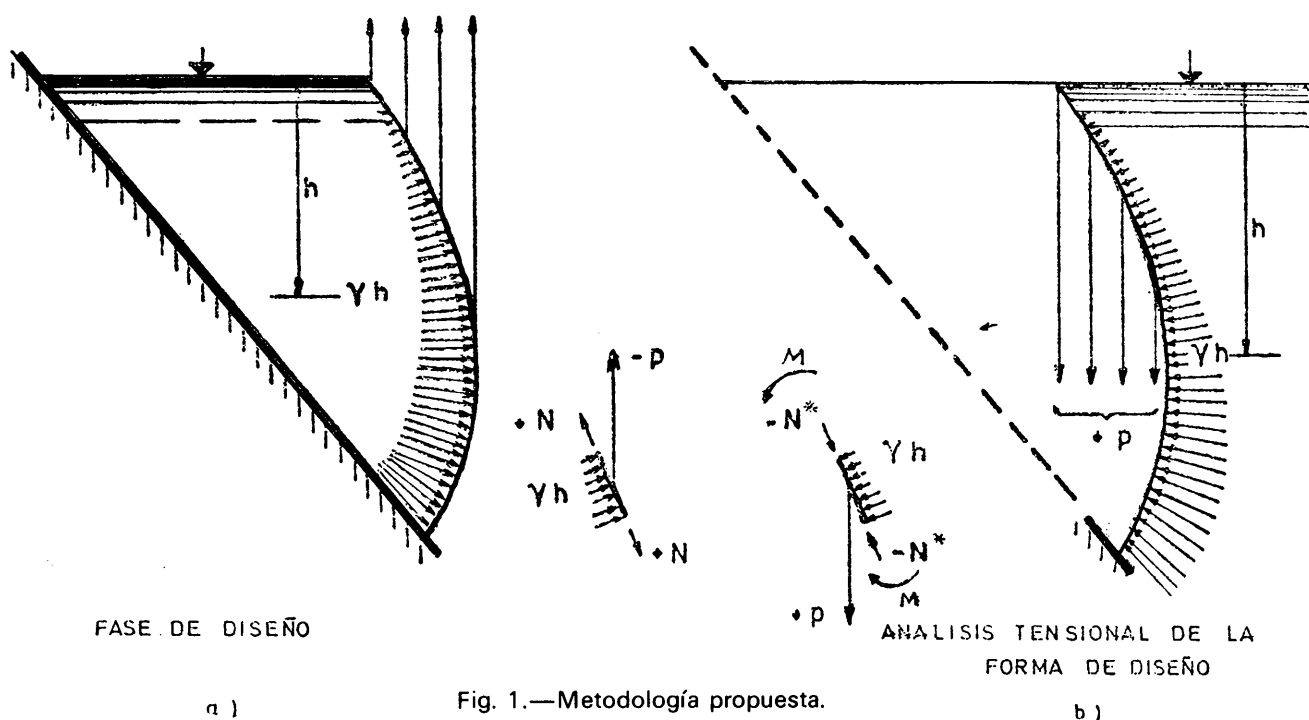


Fig. 1.—Metodología propuesta.

expone en detalle en la publicación (2), consta de dos partes bien diferenciadas (figura 1):

1. Obtención de la forma de diseño (figura 1.a).
2. Análisis tensional de la forma obtenida (figura 1.b).

Etapla 1. Obtención de la forma de diseño

La forma de diseño, es decir, la geometría de la superficie media de la membrana en equilibrio con las cargas depende de varios factores:

- a) Método de obtención de la superficie antifunicular.
- b) Solicitaciones actuantes.
- c) Espesor de la membrana.
- d) Módulo de elasticidad de la membrana.
- e) Forma inicial de la membrana insertada en el contorno (intersección de la bóveda con el terreno).

A continuación, se comentan brevemente estos factores.

- a) *Método de obtención de la superficie antifunicular.*

El método utilizado es analítico, frente a diversos intentos experimentales anteriores en esta dirección, como por ejemplo, los ensayos en modelo reducido en Fialho en el Laboratorio

Central de Ingeniería Civil de Lisboa (3). La técnica de cálculo y obtención de la superficie antifunicular mediante la resolución de la ecuación de la membrana, ha sido el método de los elementos finitos. El carácter numérico de este método permite una gran flexibilidad en el tratamiento de situaciones reales encontradas en la práctica (variación de espesores, cerradas arbitrarias, casos de cargas generales, etc.). La teoría de la membrana que se considera adecuada corresponde a la denominada estática no lineal, es decir, considera la existencia de grandes movimientos, pequeñas deformaciones y material elástico y lineal (*).

- b) *Solicitaciones atenuantes.*

La definición de las cargas que deben estar en equilibrio en la configuración final de la membrana (que posteriormente será tomada como superficie de la presa) constituye un problema de no clara respuesta, y para el que existen varias posibilidades de cargas a considerar:

1. Carga hidráulica.

(*) Este procedimiento ha sido estudiado por P. Smith, aplicándolo a estructuras en general, sin plantearse los problemas específicos que aparecen en su aplicación al diseño de presas bóveda (4).

2. Carga hidráulica y peso propio (hormigón).
3. Carga hidráulica (peso específico $0,5 \text{ tm}^{-3}$) y peso propio (hormigón).

Se ha utilizado como carga para la obtención de la superficie antifunicular la situación de peso propio (hormigón) más la presión hidrostática, para permitir que, partiendo de esta situación de «compresión pura», las variaciones de carga y, por tanto, de tensiones sobre este hipotético estado de equilibrio sean las menores posibles. En efecto, las situaciones reales: (a) peso propio (vacío) y (b) peso propio + carga hidráulica (llena), corresponde a la resta y suma de la mitad de la presión hidrostática de la situación adoptada, y por lo tanto, en principio, salvo variaciones pequeñas de los valores de los esfuerzos axiales, deberían producir valores simétricos en las tensiones máximas de ambos parámetros de la presa (*).

c) Ley de Espesores.

Se ha elegido como ley de variación de espesores

$$e = a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + b_1 X + b_2 X^2$$

que define el espesor de cada punto de la membrana (Fig. 2).

Se ha adoptado esta ley de espesores por la facilidad que supone comprobar los efectos de modificaciones en sus coeficientes en la variación del estado tensional de la presa, característica importante debido al carácter iterativo y realimentado utilizado en este análisis (**).

d) Módulo de elasticidad.

Este valor corresponde al material de la membrana, y su variación permite obtener distintas formas de superficies antifuniculares, de las cuales se eligen aquéllas que satisfagan los criterios de diseño: desplome mínimo de la

(*) De acuerdo con los estudios realizados, puede tomarse como sollicitación de diseño, el peso propio más una fracción de carga hidráulica comprendida entre la mitad y el total. No siendo esta fracción relativamente importante en el resultado, se recomienda, sin embargo, la situación de peso propio más mitad de carga hidráulica.

(**) El programa de computador realizado permite otros tipos de variación para esta ley de espesores.

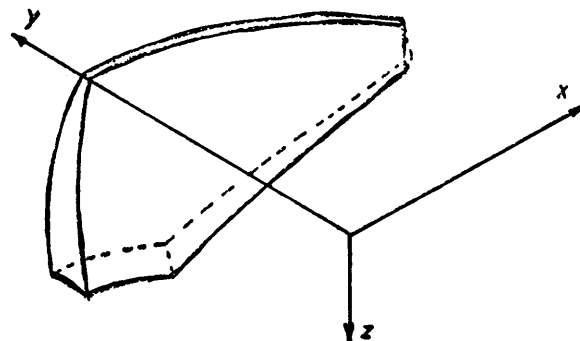


Fig. 2.—Ejes de referencia en la definición de espesores (el eje oy es paralelo a la dirección del río) $3 = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + b_1 x + b_2 x^2$.

presa y ángulos de ataque de los arcos al macizo de cimentación (*).

e) Forma inicial.

La obtención de la superficie de equilibrio de la membrana con las cargas actuantes se lleva a cabo mediante una técnica iterativa, dado el carácter no lineal (grandes movimientos de conjunto). Se parte de una superficie inicial y, tras sucesivos cálculos lineales, (**) se alcanza una superficie final de equilibrio. Esta puede depender, de un modo importante, de la forma inicial de la membrana. De este hecho se hará uso para llegar a obtener la forma posible o factible. Es decir, una vez definida la superficie inicial, módulo de elasticidad, así como su ley de espesores, y hallada la superficie que está en equilibrio con las cargas, puede que no se satisfagan algunos de los condicionamientos impuestos (criterios de diseño) referentes a su forma. En particular la altura final de la presa (situación de equilibrio) no coincide con la inicial. Se procede, en este caso, al cambio de la superficie inicial, y mediante un nuevo proceso iterativo, se puede llegar a la forma deseada (Figs. 3 y 10).

(*) Se sugiere el rango de 1.500 a 3.000 tm^{-2} se adopta como colicitación de diseño peso propio (hormigón) y mitad de carga hidráulica. En el caso de peso propio y carga hidráulica, deben duplicarse estos valores.

(**) Existen varias posibilidades de resolución de las ecuaciones no lineales en elementos finitos de membrana. La más general, considerada en el programa de computador, consiste en la actuación de la carga de tramos, y una técnica de Newton-Raphson (tensiones iniciales) en cada tramo de carga.

$$X_i = X_{i-1}$$

$$Y_i = Y_{i-1} - \frac{\Delta Z_{i-1}}{\lambda \alpha}$$

$$Z_i = Z_{i-1} - \frac{\Delta Z_{i-1}}{\lambda}$$

α y λ Parámetros de convergencia geométrica

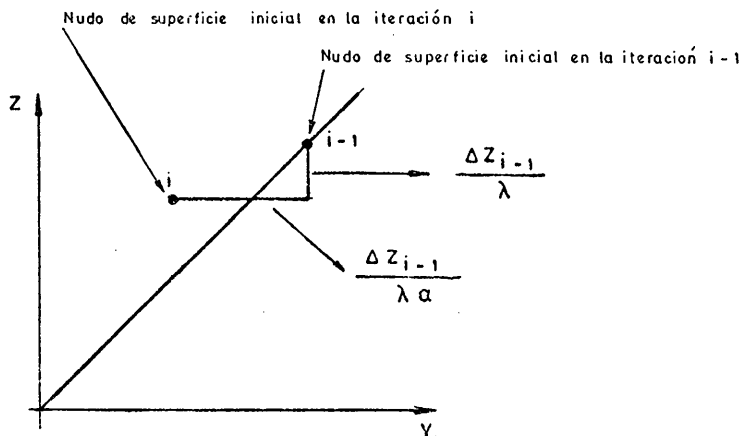


Fig. 3.—Transformación de coordenadas para la superficie inicial.

Etapla 2. Análisis tensional de la forma obtenida

En esta segunda parte, se realiza un análisis tensional de la forma adoptada, sometida a las cargas de uso. El método elegido es, de nuevo, el de los elementos finitos, en el cual se supone la presa formada por una superficie poliédrica de elementos planos, y el terreno se simula mediante unos elementos unidimensionales con rigidez torsional y axial (*).

2. SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA MEMBRANA FASE DE DISEÑO

2. 1. Método de análisis

La consiguiente secuencia de pasos constituye el algoritmo utilizado para obtener la confi-

(*) Los elementos finitos considerados, tipo lámina delgada (2-D), no corresponden, evidentemente, a la única posibilidad de análisis de la presa una vez definida su geometría. Elementos finitos de clase (3-D), como los que se utilizan en el programa APAP (5), o bien, el más simple de Trial Load (6), son igualmente adecuados. Ver, a este respecto, la publicación (7).

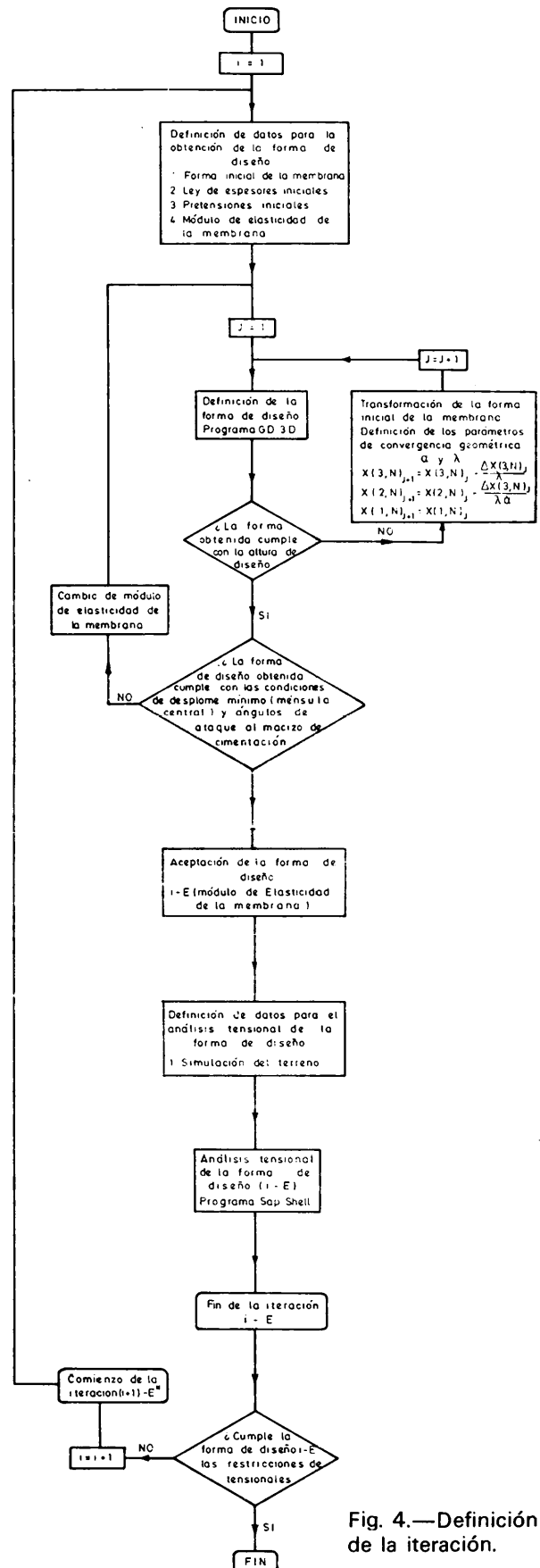


Fig. 4.—Definición de la iteración.

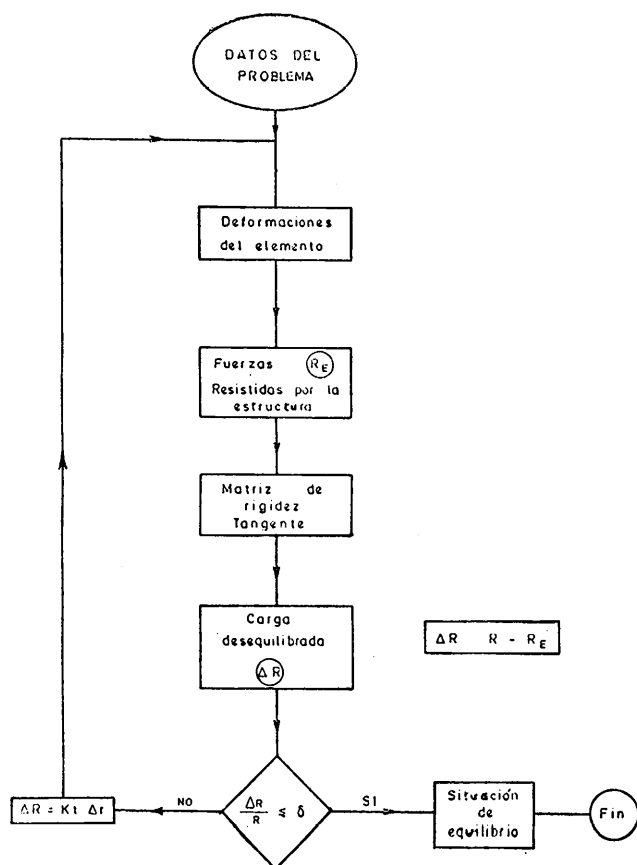


Fig. 5.—Método de análisis de la membrana.

guración de equilibrio de una membrana sometida a una carga dada (Fig. 5).

1. La lámina de partida se discretiza en una malla de elementos finitos (triangulares o cuadriláteros), cuya geometría y topología o interconexión constituyen los datos en el programa utilizado. Si se adopta una aproximación inicial de los desplazamientos nodales, puede acelerarse la convergencia del método. Si no se parte de una estimación inicial de los desplazamientos, entonces el punto de arranque será la solución trivial $r_0 = 0$.
2. Se calculan las deformaciones del elemento, referidas a ejes locales. Estas son obtenidas a partir de los desplazamientos nodales, expresados en coordenadas globales, a través de relaciones no lineales.
3. Se determinan las fuerzas resistidas por cada elemento en los puntos nodales, respecto a ejes locales. La matriz de

rigidez secante K_s es utilizada en el método de los elementos finitos para transformar las deformaciones del elemento (obtenidas en el paso 2) a fuerzas elementales.

La carga total resistida por la estructura en la presente configuración se deduce transformando a ejes globales las fuerzas elementales halladas anteriormente, sumando en cada nudo las fuerzas que le corresponden como perteneciente a distintos elementos.

4. A continuación se calcula, en ejes locales, la matriz tangente K_t para cada elemento, transformándola después al sistema global de coordenadas. La matriz de rigidez tangente relaciona los incrementos de los desplazamientos, Δr , con los correspondientes incrementos de fuerzas nodales, ΔR .

Posteriormente, se procede al ensamble de estas matrices tangentes, obteniendo la matriz tangente global.

5. La carga total resistida por la estructura se resta de la carga aplicada, determinando así la carga desequilibrada que actúa sobre la estructura en la presente configuración.
6. Si la carga desequilibrada, ΔR , es pequeña frente a la carga aplicada, R , entonces la presente configuración para la estructura es considerada como configuración de equilibrio. Si la carga desequilibrada, ΔR , es todavía apreciable en la presente configuración, entonces es necesario añadir a los desplazamientos los incrementos de éstos (Δr) que se deduzcan de la resolución del sistema:

$$\Delta R = K_t \Delta r$$

Los pasos de dos a seis son repetidos hasta que se alcance una configuración de equilibrio para cada incremento de carga.

El algoritmo descrito constituye la base del programa, que se denomina «Grandes desplazamientos en tres dimensiones (GD3D)».

2. 2. Consideraciones sobre la convergencia de la solución

En el diseño de presas de bóveda, se adopta frecuentemente, por conveniencia, como configuración inicial de la membrana, un plano o superficie poliédrica, con lo que se simplifica enormemente la preparación de datos, pero existe la desventaja de que la membrana plana es inestable o crítica frente a cargas transversales. Este hecho se traduce en que la matriz de rigidez tangente K_t^0 inicial es singular, con lo cual esta situación de arranque para el proceso iterativo no es válida.

La técnica utilizada aquí, y que se describe a continuación, tiene las ventajas de ser fácil de aplicar y suficientemente estable numéricamente respecto al proceso convergente. Consiste en considerar nulos los desplazamientos iniciales $r^0 = 0$ —en el caso de que la configuración inicial sea plana sería $K_t^0 = 0$ —, pero se modifica la matriz de rigidez tangente inicial K_t^0 , mediante la introducción de unas tensiones iniciales de partida σ_x^0 y σ_y^0 que permiten, mediante la sencilla consideración de unos valores en el programa de computador, eliminar del carácter singular de la matriz tangente. De este modo se pueden utilizar, en la situación inicial del proceso iterativo, superficies planas o cuasiplanas (*).

Una vez que el proceso iterativo está en marcha, se anulan las pretensiones σ_x^0 y σ_y^0 , y se permite que la membrana converja libremente, bajo las cargas actuantes, a su configuración final de equilibrio.

3. ANALISIS DE LA PRESA BOVEDA COMO LAMINA DELGADA CON SOPORTES ELASTICOS DE VOGT

Una vez obtenida, con el programa GD3D, una forma posible o factible de la presa, desde el punto de vista geométrico, hay que comprobar que el estado tensional es adecuado. Para ello, esta estructura laminar se analiza mediante

(*) Los valores de estas pretensiones, serían teóricamente los correspondientes a la situación final de equilibrio de la membrana. De este modo no sería necesaria ninguna iteración. Se asignan valores de 200 a 300 tm^{-2} para presas normales.

la técnica de los elementos finitos, eligiendo una de las dos alternativas siguientes:

- a) Considerando la lámina como un ensamblaje de elementos planos.
- b) Considerándola como un caso especial de la elasticidad tridimensional.

Se ha adoptado la primera posibilidad, en razón de las siguientes consideraciones:

1. Aprovechamiento directo de la salida de resultados, obtenida con el programa de «Diseño» GD3D, como datos de entrada del cálculo elástico de la presa.
2. Utilización del desacoplamiento entre los estados de membrana y de flexión, que se obtiene al considerar la lámina como un ensamblaje de elementos planos, lo que permite formular la matriz de rigidez del elemento laminar de un modo simple.
3. La economía en tiempo de uso de ordenador ha sido una razón especial, particularmente si se considera la posibilidad de reiterados análisis hasta alcanzar la solución final.

— Pre-tensiones.

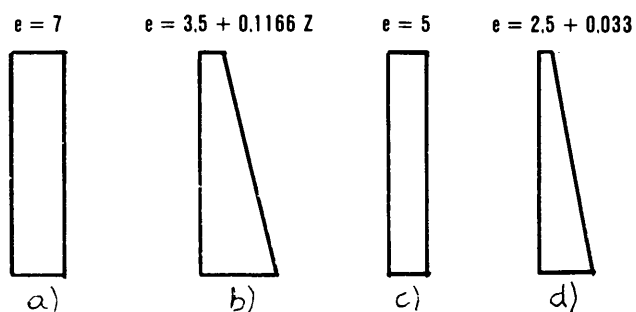
Al considerar como situación inicial una membrana plana, es necesario introducir, de acuerdo con el apartado anterior 2. 2. unas pre-tensiones cuyos valores son:

$$PSX = 250 \text{ T/m}^2.$$

$$PSY = 200 \text{ T/m}^2.$$

4. 1. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de la membrana

Se han considerado cuatro posibles leyes de espesores (e) y, para cada una de ellas, cuatro posibles valores de sus módulos de elasticidad:



4. SENSIBILIDAD DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO

Con el fin de estudiar la sensibilidad de los distintos parámetros de diseño, se ha analizado el siguiente caso:

— *Forma de la cerrada (Fig. 6).*

Se considera una cerrada trapezoidal, simétrica y coplanaria, de 65 m. de altura y 130 m. de cuerda en coronación.

— *Forma y discretización de la membrana insertada (Fig. 7).*

Se ha insertado una membrana plana, y se ha discretizado en 17 elementos membrana con 24 nudos.

— *Solicitaciones de diseño.*

La carga considerada es la mitad de la carga hidráulica (suponiendo peso específico del agua $0,5 \text{ tm}^{-3}$) y peso propio del hormigón en sentido inverso, de abajo hacia arriba. No se han previsto escalones de carga, y el test de

convergencia se ha evaluado en 0,01; es decir, la relación entre la carga resistida por la membrana y la carga aplicada es de 0,01.

Los módulos de elasticidad considerados son:

$$E_m = 8.000 \text{ T/m}^2.$$

$$E_m = 6.000 \text{ T/m}^2.$$

$$E_m = 4.000 \text{ T/m}^2.$$

$$E_m = 2.000 \text{ T/m}^2.$$

De este estudio, se deduce la fuerte influencia del módulo de elasticidad en el desplome de la ménsula central, y la poca relación que tiene el desplazamiento vertical con la ley de espesores (Figs. 8 y 9).

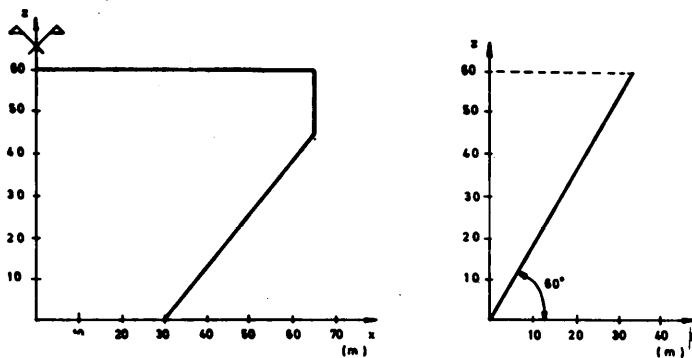


Fig. 6.—Forma de la cerrada.

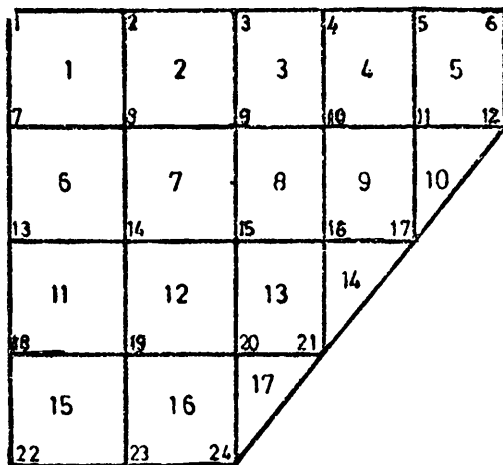
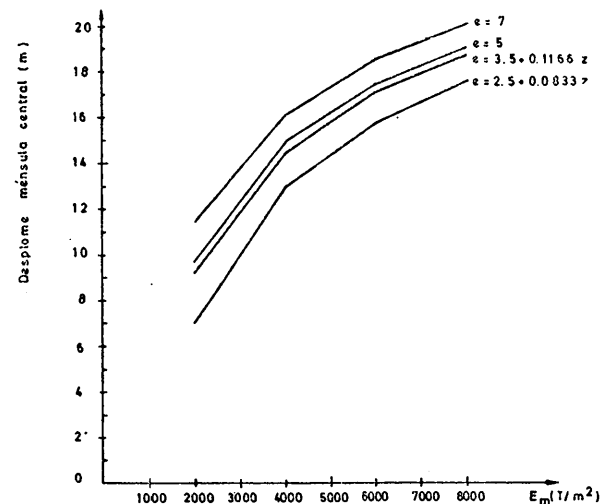
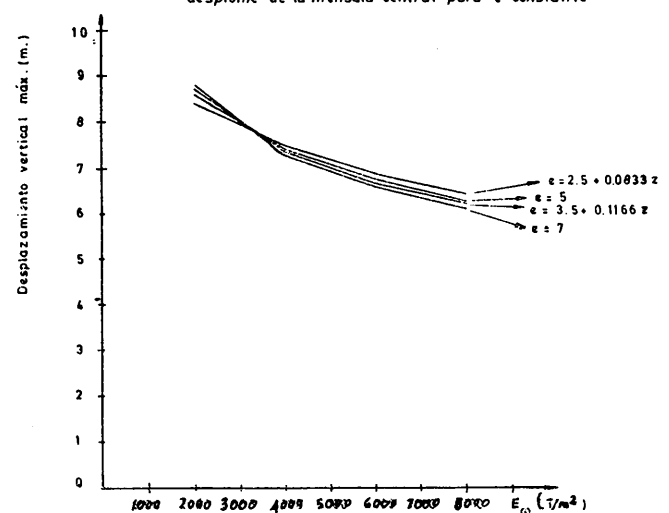


Fig. 7.—Discretización de la membrana.



a) Relación entre el módulo de elasticidad (E_m) y el desplome de la ménsula central para e constante



b) Relación entre el módulo de elasticidad (E_m) y el máximo desplazamiento vertical para e constante

Fig. 8.—Gráficas comparativas de los resultados obtenidos para $\alpha_m = 60^\circ$ variando el módulo de elasticidad (E_m) y su ley de espesores.

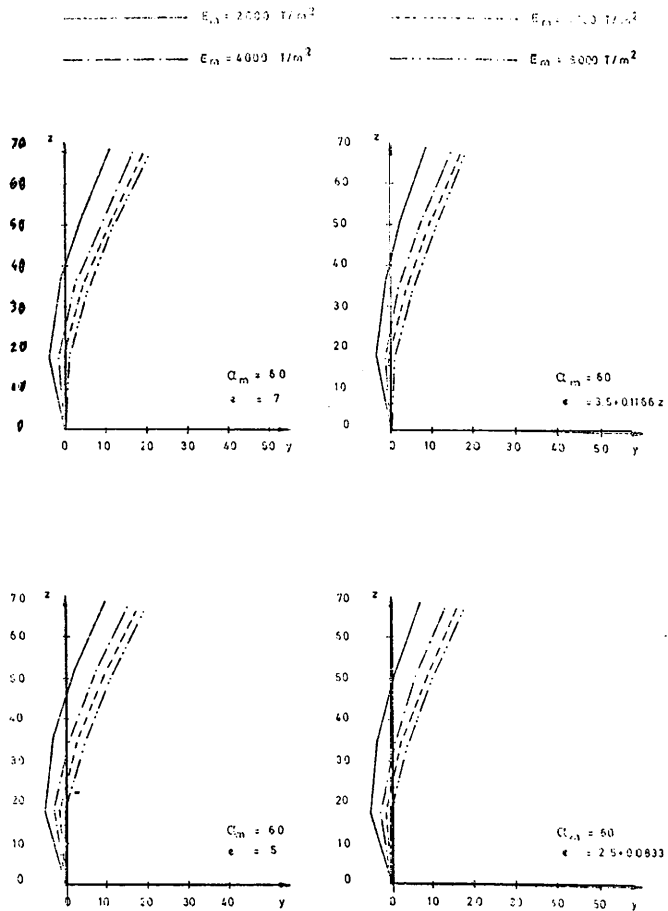


Fig. 9.—Fibras medias de la ménsula central.

4. 2. Estudio de los parámetros de convergencia α y λ

Como se ha expuesto, uno de los problemas que conlleva la aplicación de esta metodología, corresponde al no cumplimiento de las restricciones geométricas, referentes a la altura de la presa. Con objeto de que se satisfagan, se propone un proceso iterativo, en el cual se va modificando la geometría de la superficie inicial de la membrana (Fig. 3), en función de los resultados de la iteración anterior, hasta que se alcance la verificación de las condiciones impuestas (Fig. 10).

Para estudiar la validez de la transformación propuesta y los posibles valores de los parámetros de convergencia geométrica α y λ , se han procesado los siguientes casos.

$$e = 3,5 + 0,166 Z \text{ y } E_m = 2.000 \text{ T/m}^2.$$

Se han considerado cuatro posibles inclina-

ciones del plano de la membrana (superficie inicial).

$$\begin{aligned} \alpha_m &= 75^\circ \\ \alpha_m &= 60^\circ \\ \alpha_m &= 45^\circ \\ \alpha_m &= 30^\circ \end{aligned}$$

De este análisis se deduce:

- La gran influencia de la pendiente media de la superficie inicial de la membrana en el desplazamiento vertical de la misma (Fig. 11).
- La convergencia del proceso iterativo geométrico se logra en un número infe-

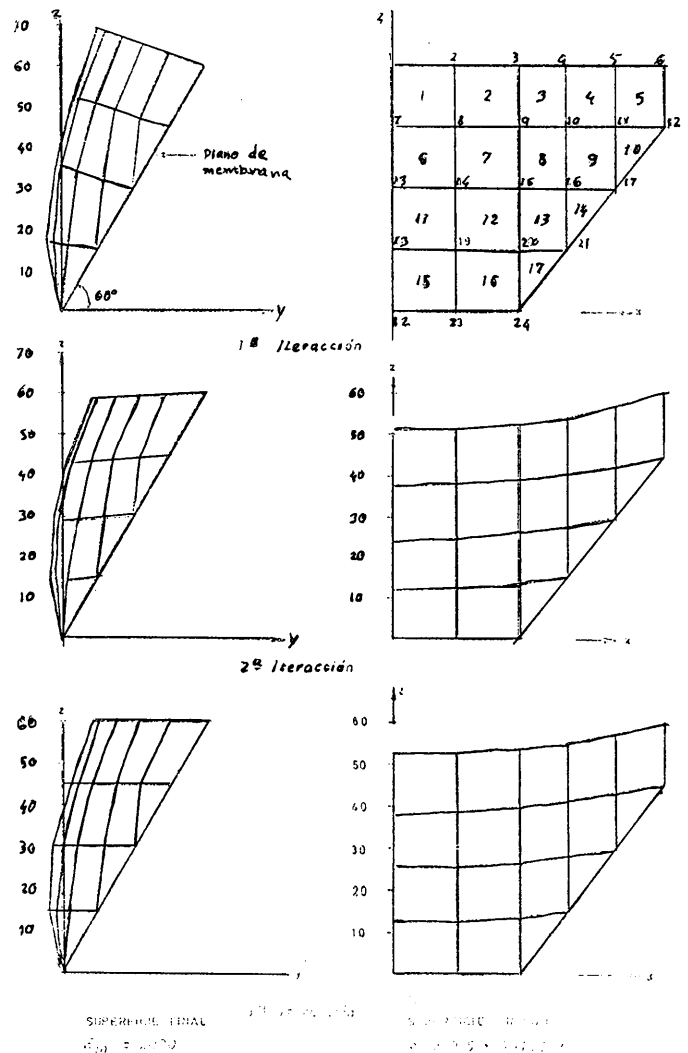


Fig. 10.—Aplicación del proceso de convergencia geométrica.

UNA CONTRIBUCION AL DISEÑO AUTOMATICO DE PRESAS BOVEDA

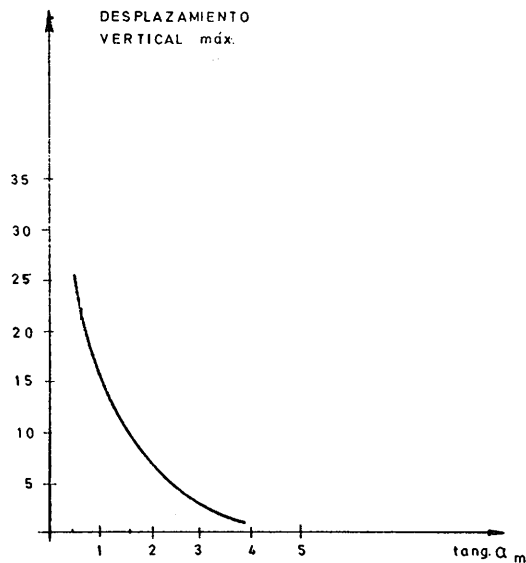


Fig. 11.—Relación entre la pendiente media de la superficie inicial y el máximo de desplazamiento.

rior a cuatro iteraciones. En cerradas en las cuales se inserta una membrana cuya pendiente media (α_m) sea superior a 45° , los parámetros de convergencia geométrica son $\lambda = 1$ y $\alpha = \tan \alpha_m$ (Fig. 12). Si la pendiente media es inferior a 45° , se recomienda proceder de la forma siguiente: Para obtener la superficie inicial de la segunda iteración, se lleva a cabo la transformación definida por los parámetros α y λ , pero adoptando ahora una pendiente más cercana a la superficie final. Esto se consigue considerando una fracción de valor $\frac{\Delta Z_{i-1}}{\lambda}$ correspondiente a la denominación de ordenada 2, del punto $i - 1$ al i (Fig. 3), conservando el valor $\frac{\Delta Z_{i-1}}{\lambda \alpha}$ de la transformación de la coordenada y . Esta transformación debe contener los siguientes parámetros de convergencia $\lambda > 4$ y $\alpha < 0,1$ (Fig. 13).

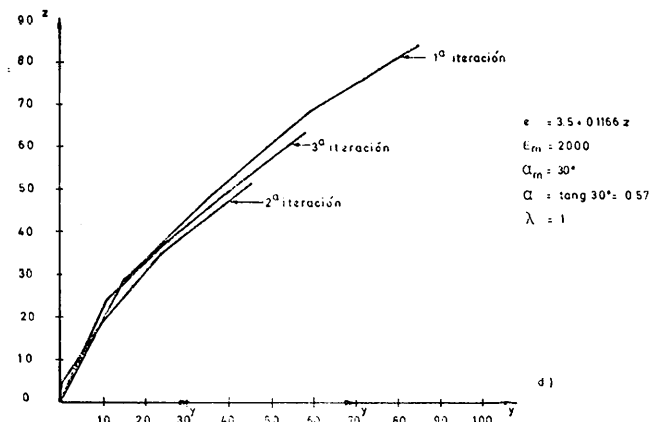
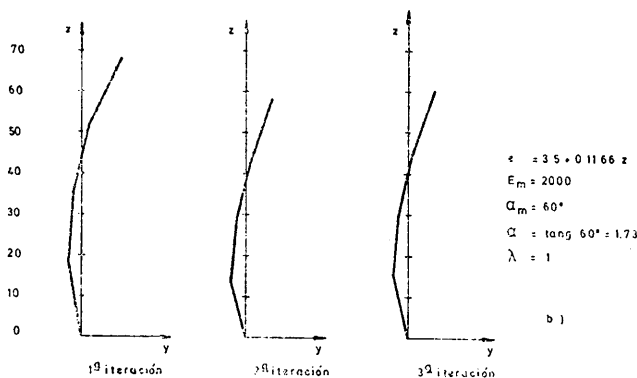
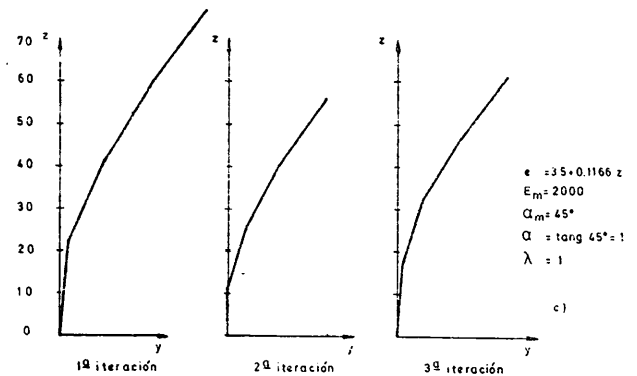
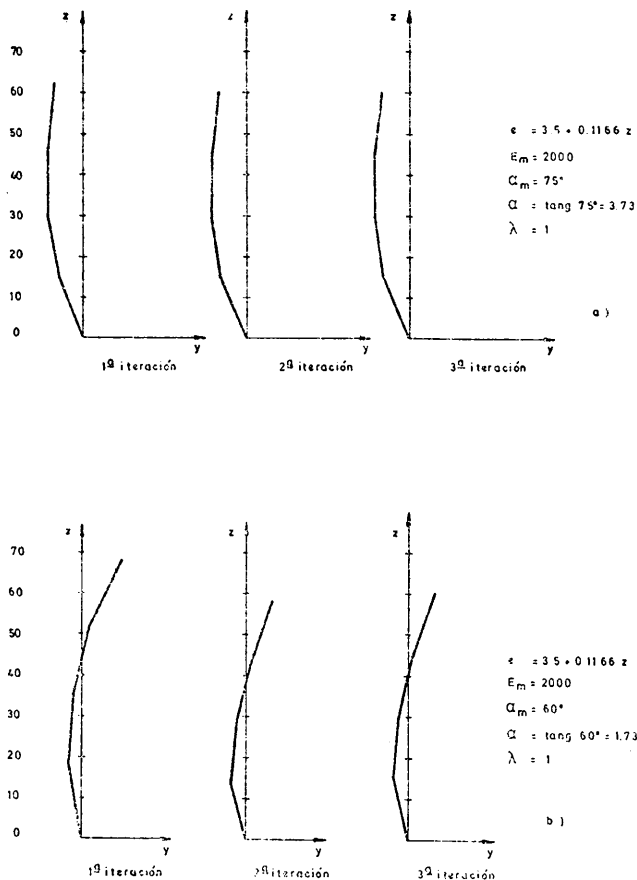


Fig. 12.—Proceso de convergencia geométrica (se representa la fibra media de la ménsula).

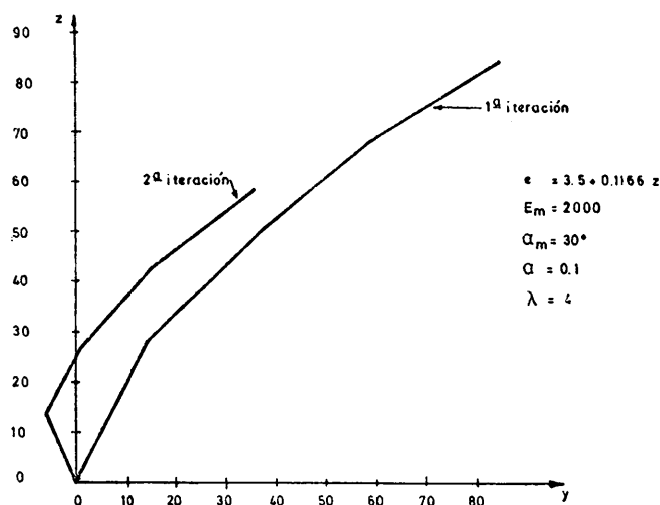


Fig. 13.—Proceso de convergencia geométrica ($\alpha_m < 45^\circ$).

5. APLICACION DE LA METODOLOGIA

Como ejemplos de las posibilidades del método expuesto, se consideran dos casos, correspondientes a dos presas:

1. Presa de Susqueda.
 2. Presa de Mingorría.
1. La primera aplicación del método se realiza a una presa, la de Susqueda, ya construida, para la que existe una excelente información (8). De este modo se puede comprobar la bondad del método.
 2. La segunda, corresponde a la presa de Mingorría, sobre el río Adaja (Avila), en fase de proyecto. La razón por la cual se ha elegido esta presa, estriba en la dificultad que entraña el encajar una presa de bóveda en la cerrada adoptada, y, con ello comprobar la posibilidad de aplicación del método propuesto en situaciones relativamente límites. En efecto, la presa de Mingorría está situada en un valle con una relación cuerda/altura muy alta, cerca de 5, teniendo también una marcada asimetría.

Para la aplicación de la metodología propuesta, es preciso la realización previa de un trabajo de preparación de datos:

1. Preparación de datos para la simulación de la membrana (Programa GD3D).

- 1.1. Constantes generales.
- 1.2. Forma de la cerrada.
- 1.3. Forma inicial de la membrana y su discretización en elementos finitos.
- 1.4. Ley de espesores iniciales.

2. Preparación de datos para el análisis tensional de la forma de diseño.

- 2.1. Constantes generales.
- 2.2. Simulación del terreno mediante los «Elementos contorno».

3. Restricciones de comportamiento tensional y geométrico impuestas a la forma de diseño.

4. En un proceso previo o iteración inicial, es necesario conocer los siguientes parámetros:

- a) Pre-tensiones que hacen convergente el proceso iterativo que se realiza dentro del programa GD3D (apartado 2.2.).
- b) Número de incrementos de carga, si se estiman necesarios, para lograr la convergencia del proceso iterativo del programa GD3D.
- c) Rango de valores del módulo de elasticidad de la membrana, dentro del cual se satisfacen las restricciones de forma impuestas a la presa.
4. Definición de los parámetros de convergencia, α y λ , necesarios para el cumplimiento de las restricciones geométricas impuestas a la presa, referentes a la altura de la presa (Apartado 4.2.).

5.1. Presa de Susqueda

5.1.1. Preparación de datos para la simulación de membrana

Constantes generales

Peso específico de la membrana $\gamma_m = 2,4 \text{ t/m}^2$.
 Coeficiente de Poisson de la membrana $\mu_m = 0,2$
 Peso específico del agua $\gamma_a = 1 \text{ t/m}^3$.
 Altura de cálculo 122 m.

UNA CONTRIBUCION AL DISEÑO AUTOMATICO DE PRESAS BOVEDA

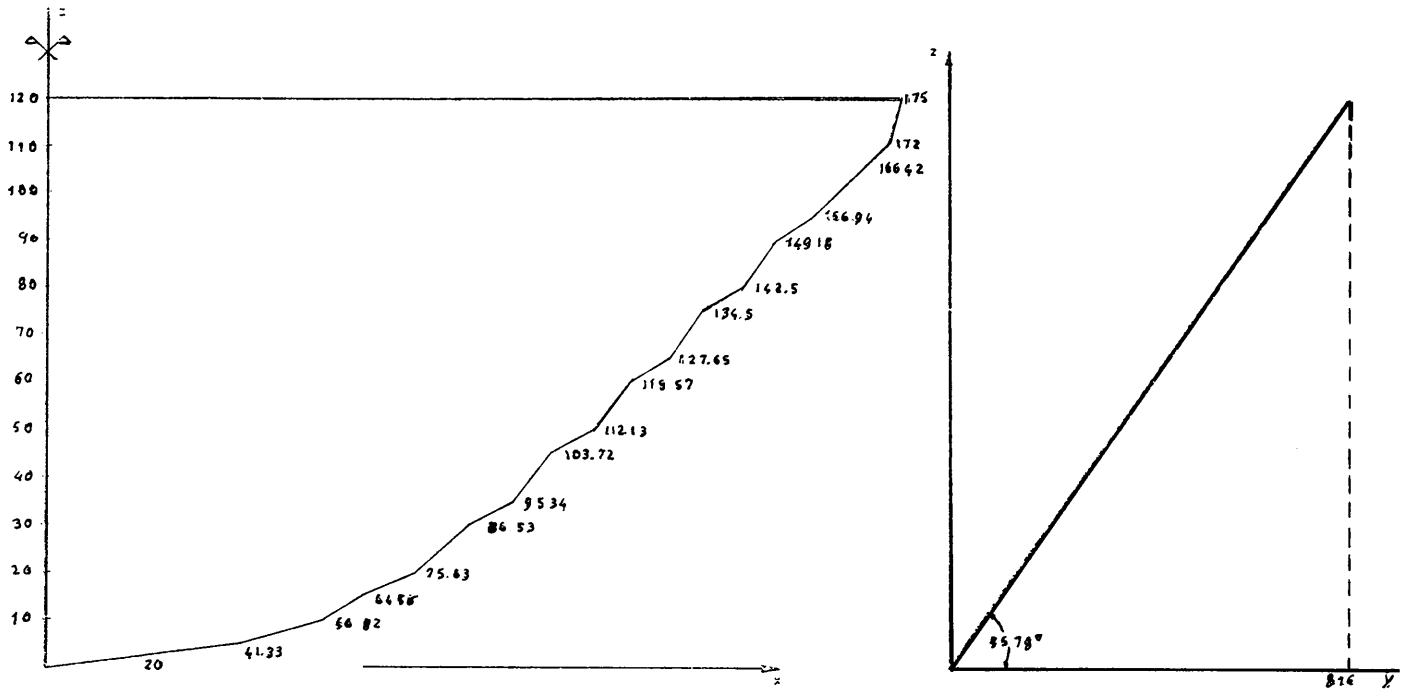


Fig. 14.—Forma de la cerrada de la presa de Susqueda.

Forma de la cerrada (Fig. 14)

Es una cerrada simétrica y coplanaria, cuyo plano forma un ángulo de 55,78° con la horizontal.

Forma inicial de la membrana (Fig. 15)

Se parte, como situación inicial, de una membrana plana, insertada en la cerrada anteriormente descrita, y se discretiza en una malla con 52 elementos membrana y 71 nudos.

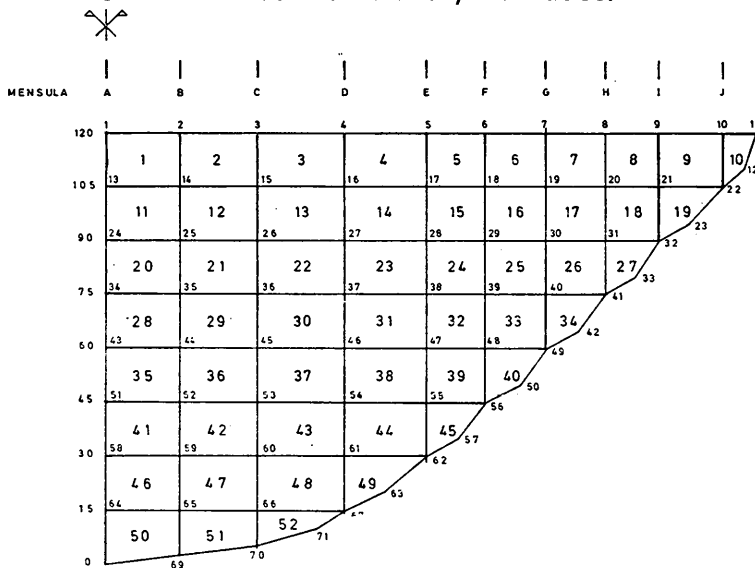


Fig. 15.—Discretización de la membrana (Susqueda).

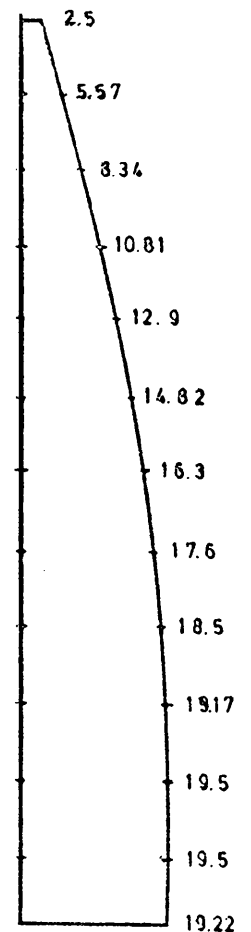
Ley inicial de espesores (Fig. 16)

Esta elección de espesores como situación inicial se ha realizado mediante la aplicación de las fórmulas dadas por el Bureau of Reclamation, en su método de predimensionado (4).

Figura 16.

Ley de espesores inicial.

$$e = 2,5 + 0,323z - 0,00153z^2$$



UNA CONTRIBUCION AL DISEÑO AUTOMATICO DE PRESAS BOVEDA

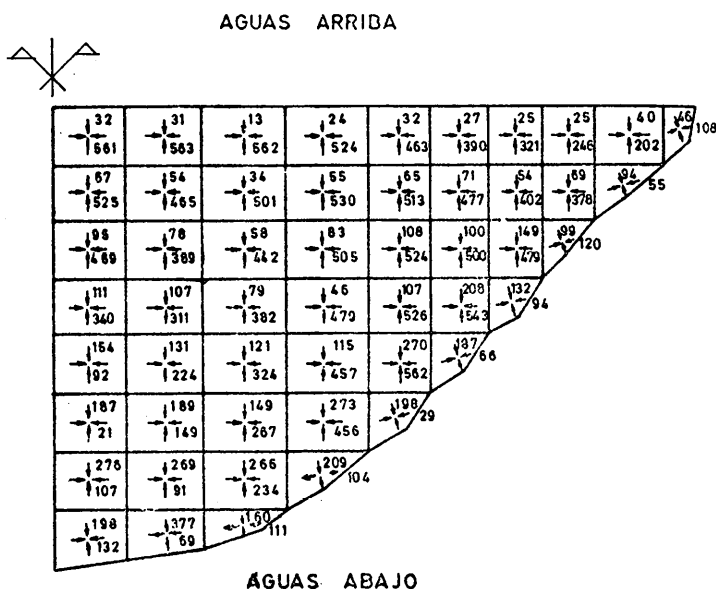
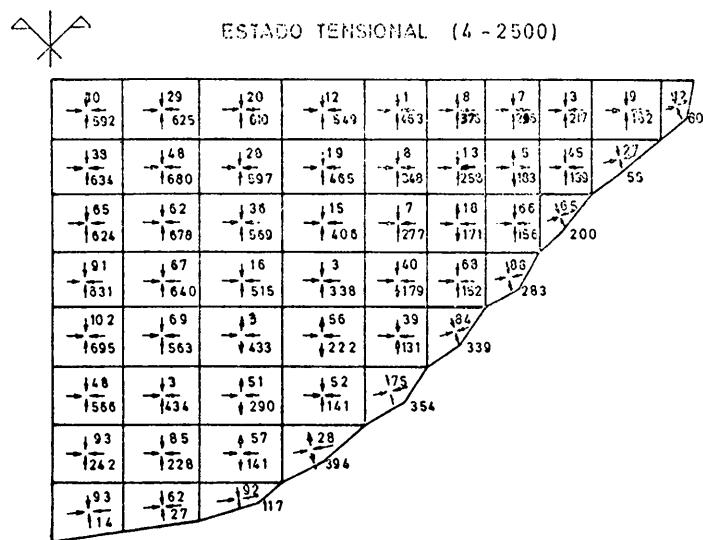


Fig. 17.—Estado tensional iteración 4-2.500.

5.1.2. Preparación de datos para el análisis tensional de la forma de diseño

Constantes generales.

Hormigón:

Peso específico..... $\gamma_h = 2,4 \text{ t/m}^3$.
 Módulo de elasticidad.... $E_h = 2,0 \cdot 10^6 \text{ t/m}^2$.
 Coef. de Poisson $\mu_h = 0,2$
 Coef. de dilatación.... $C_h = 10^{-5} \text{ C}^{-1}$

Roca:

Módulo de elasticidad $E_r = 1/3 E_h$
 Coeficiente de Poisson.... $\mu_r = 0,24$

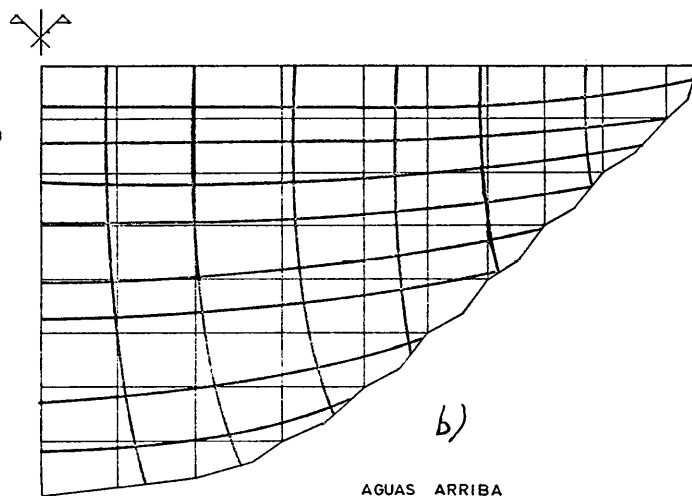
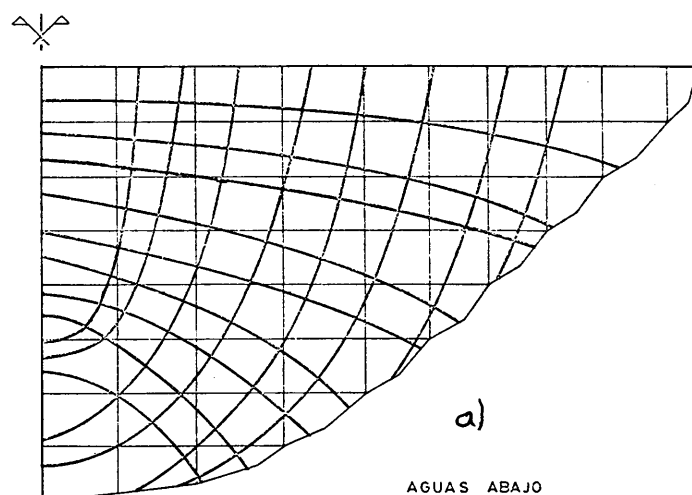


Fig. 18.—Trayectoria de las isostáticas (presa de Susqueda).

Agua:

Peso específico..... 1 t/m^3 .
 Altura de cálculo..... 122 m .
 Aumento altura de lámina máxi-
 ma avenida $4,6 \text{ m}$.

Simulación del terreno mediante los "Elementos contorno"

En una primera fase, sólo se considera la flexibilidad de la roca debida a la acción de momento; la razón reside, en la mayor comodidad que implica en la generación de datos, y por la consideración de ser este el término que más influye en el estado tensional. El programa realizado está preparado para poder simular todo los coeficientes de la matriz de flexibilidad de Vogt.

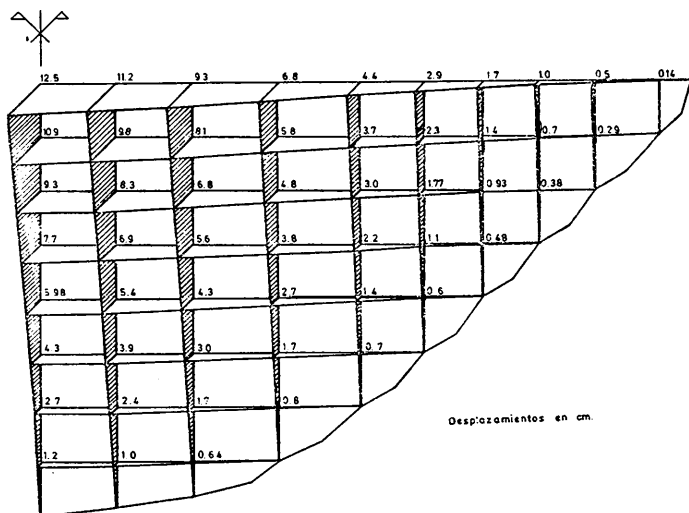


Fig. 19.—Desplazamiento en la dirección OY en la presa de Susqueda.

5.1.3. Restricciones de comportamiento

5.1.3.1. Restricciones de comportamiento tensional

Se han impuesto tres tipos de restricciones en el comportamiento tensional.

— Hipótesis 1.

Peso propio y presión hidrostática (embalse lleno) actuando sobre toda la bóveda, considerada como una lámina.

$$\sigma_{\min.} = -200 \text{ t/m}^2. \quad \sigma_{\max.} = 700 \text{ t/m}^2.$$

— Hipótesis 2.

Peso propio actuando sobre ménsulas aisladas, y presión hidrostática (embalse lleno) actuando sobre toda la bóveda, considerada como lámina.

$$\sigma_{\min.} = -100 \text{ t/m.} \quad \sigma_{\max.} = 700 \text{ t/m}^2.$$

— Hipótesis 3.

Peso propio actuando sobre ménsulas aisladas (embalse vacío).

$$\sigma_{\min.} = -200 \text{ t/m}^2. \quad \sigma_{\max.} = 700 \text{ t/m}^2.$$

5.1.3.2. Restricciones de comportamiento de forma

El desplome mínimo de la ménsula central es de 4 m. respecto a fibras medias. La altura de la presa es de 120 metros.

5.1.4. Iteración inicial

1. Pretensiones que hacen convergente el proceso iterativo:

$$PSX = 350 \text{ T/m}^2.$$

$$PSY = 200 \text{ T/m}^2.$$

2. Número de incrementos de carga.

En este caso, no se considera necesario establecer escalones de carga para lograr la convergencia del proceso iterativo.

3. Rango de valores del módulo de elasticidad de la membrana.

$$E_m = 2.000 \text{ t/m}^2.$$

$$E_m = 3.000 \text{ t/m}^2.$$

4. Los parámetros de convergencia geométrica α y λ , para este caso, son:

$$\alpha = \tan 55,78^\circ \text{ (Superficie inicial plana).}$$

$$\lambda = 1.$$

La convergencia se logra en la tercera iteración.

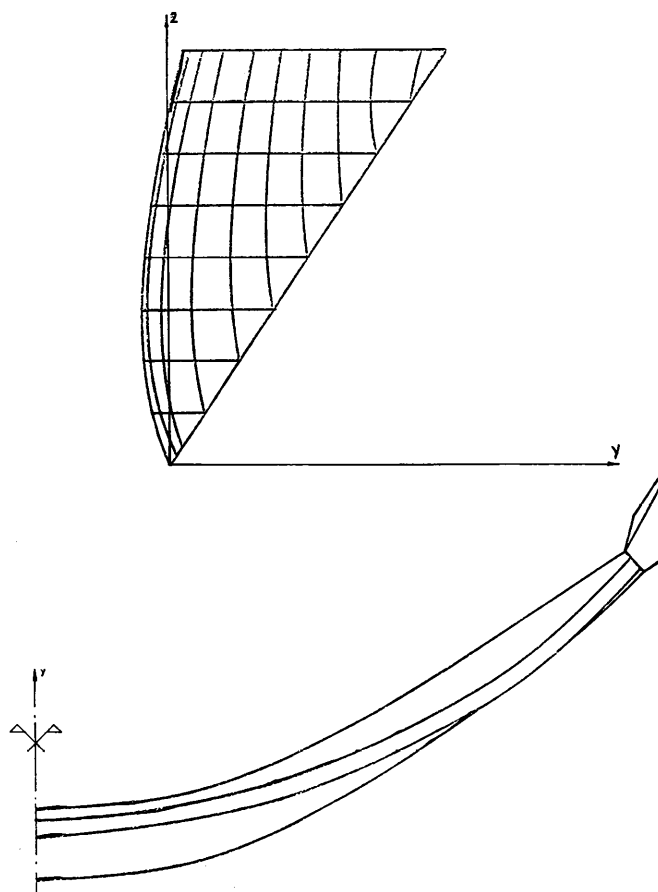


Fig. 20.—Planta y perfil (presa de Susqueda).

SOLUCION ADOPTADA

Después de realizar cuatro iteraciones, se ha adoptado como solución la correspondiente a la última iteración, cuyos parámetros de diseño y comportamiento son:

Parámetros de diseño	Ley de espesores (m.)		$45 + 0,323 z - 0,00153 z^2 + 0,000052 x^2$
	Pretensión PSX (t/m ²)		350
	Pretensión PSy (t/m ²)		200
	Módulo de elasticidad (t/m ²)		2.500
Comportamiento de la forma de diseño	Peso propio actuando sobre lámina	$\sigma_{máx}$ (t/m ²)	709
		$\sigma_{mín}$ (t/m ²)	186
	Peso propio actuando sobre ménsula	$\sigma_{máx}$ (t/m ²)	680
		$\sigma_{mín}$ (t/m ²)	92
Función mérito	Volumen de hormigón (m ³)		$5 \cdot 16 \cdot 10^5$



Ménsula central iteración 4-2.500.

5.2. Presa de Mingorría

5.2.1. Preparación de datos para la simulación de la membrana

Constantes generales

Peso específico de la membrana.....	$\gamma_m = 2,4 \text{ t/m}^3$.
Coefficiente de Poisson de la membrana.....	$\mu_m = 0,2$
Peso específico del agua.....	$\gamma_s = 1 \text{ t/m}^3$.
Altura de cálculo.....	60 m.
Aumento altura lámina máxima avenida.....	3,5 m.

Forma de la cerrada (Fig. 21)

Se adopta como contorno la curva media de la intersección de la bóveda con el terreno en el anteproyecto realizado.

Forma inicial de la membrana (Fig. 22)

Se parte, como situación inicial, de una membrana poliédrica, insertada en el contorno, y se discretiza en una malla de 80 elementos membran y 108 nudos.

Ley de espesores iniciales (Fig. 23)

Esta ley de espesores es muy similar, en la ménsula central o de referencia, a la del anteproyecto. Sin embargo, difiere sensiblemente en la ley de sobreespesores de los arcos.

5.2.2. Preparación de datos para el análisis tensional de la forma de diseño

Constantes generales

Hormigón:

Peso específico.....	$\gamma_h = 2,4 \text{ t/m}^3$.
Módulo de elasticidad....	$E_h = 2,0 \cdot 10^6 \text{ t/m}^2$.
Coefficiente de Poisson....	$\mu_h = 0,2$
Coefficiente de dilatación....	$C_h = 10^{-5} \text{ C}^{\circ-1}$

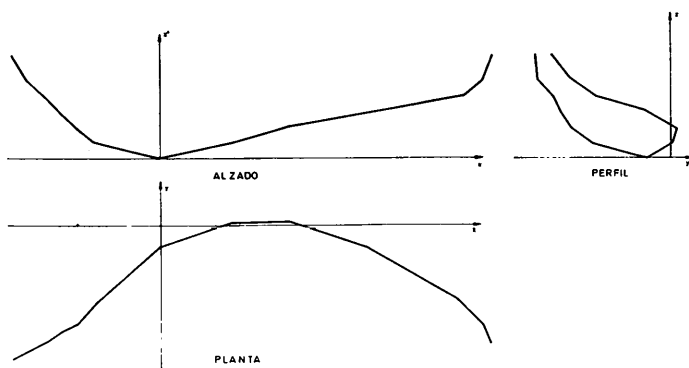


Fig. 21.—Forma de la cerrada de la presa de Mingorría.

UNA CONTRIBUCION AL DISEÑO AUTOMATICO DE PRESAS BOVEDA

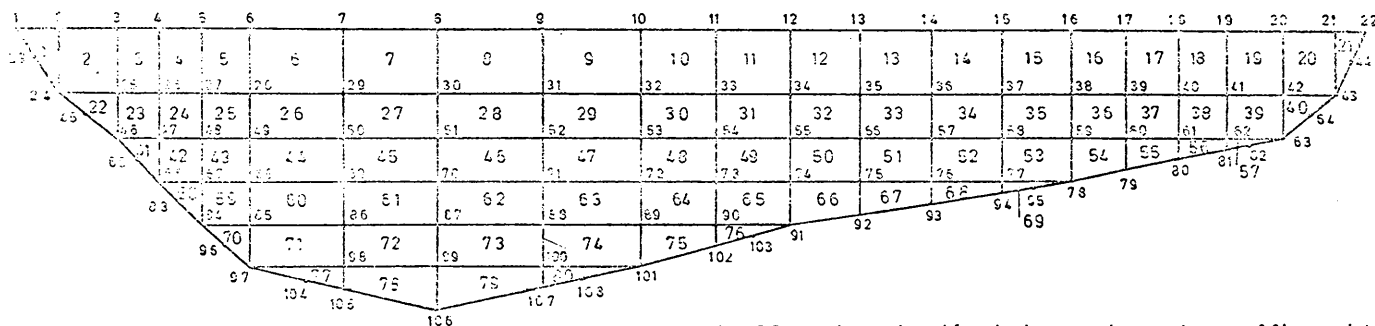


Fig. 22.—Discretización de la membrana (presa Mingorria).



Figura 23.
Ley de espesores iniciales.
Ménsula central
o de referencia.
 $3 = 5 + 0,133 + 0,00067 x^2$

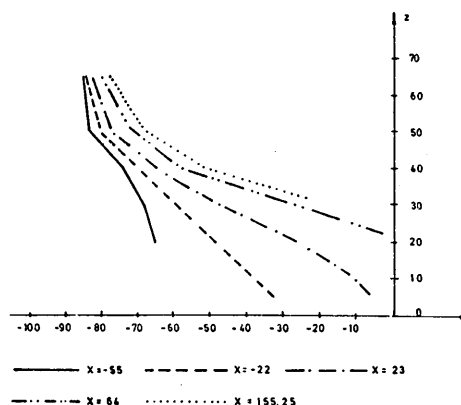


Fig. 24.—Intersección de la membrana insertada en la cerrada con planos X=cte.

Roca:

Módulo de elasticidad $E_r = 1/2 E_h$

Coefficiente de Poisson. . . . $\mu_r = 0,2$

Agua:

Peso específico. $\gamma_a = 1 \text{ t/m}^3$.

Altura de cálculo. 60 m.

Aumento altura lámina má-
xima avenida. 3,5 m.

Simulación del terreno mediante los "Elementos contorno"

Se realiza de la misma forma que en la presa de Susqueda.

5.2.3. Restricciones de comportamiento

5.2.3.1. Restricciones de comportamiento tensional

Se ha considerado el mismo tipo de restricciones de comportamiento tensional que las aplicadas en la presa de Susqueda.

5.2.3.2. Restricciones de comportamiento de forma

Se adopta como desplome mínimo (respecto a fibras medias), en la parte de más altura de la presa, 3 metros.

La altura de la bóveda es de 65 metros.

5.2.4. Iteración inicial

1. Pre-tensiones que hacen convergente el proceso iterativo:

$$PSX = 200 \text{ t/m}^2.$$

$$PSY = 200 \text{ t/m}^2.$$

2. Número de incrementos de carga.

En este caso no se considera necesario establecer escalones de carga para lograr la convergencia del proceso iterativo de definición de forma de diseño (GD3D).

3. Rango de valores del módulo de elasticidad de la membrana.

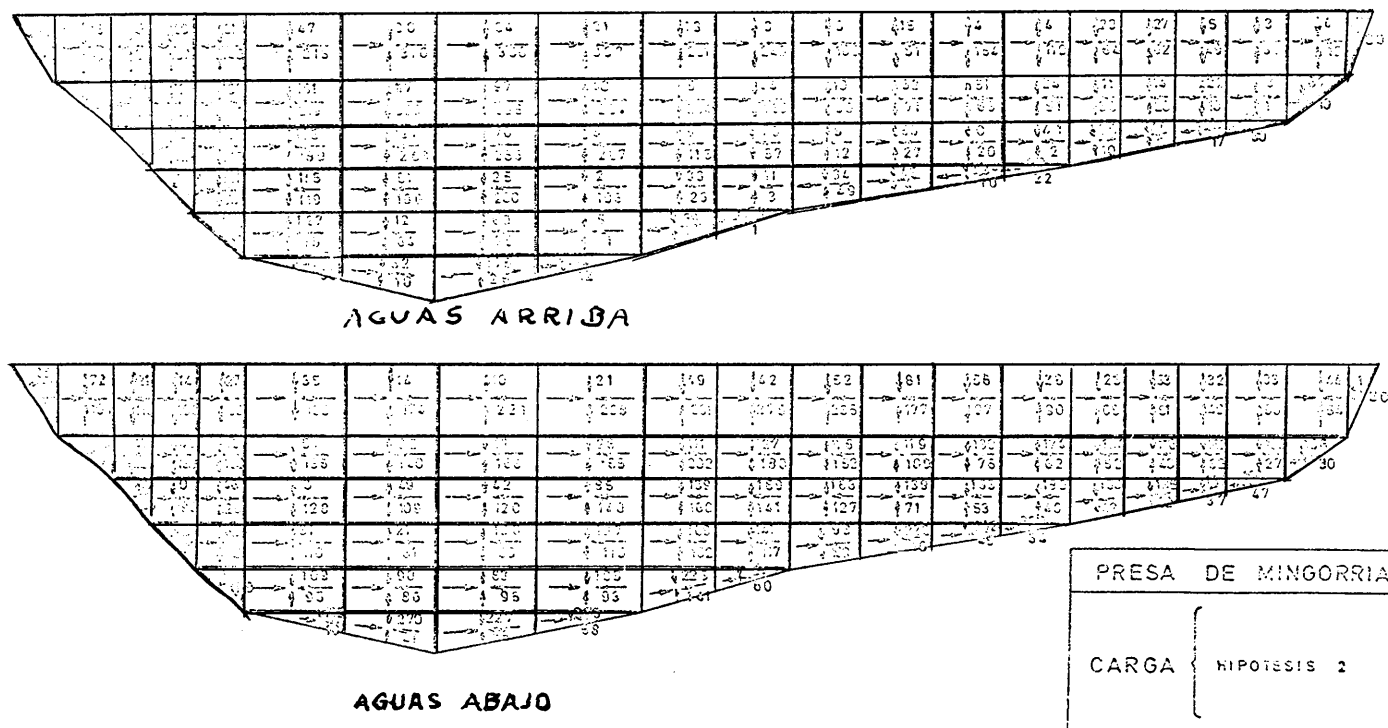


Fig. 25.—Estado tensional iteración 2-1.500.

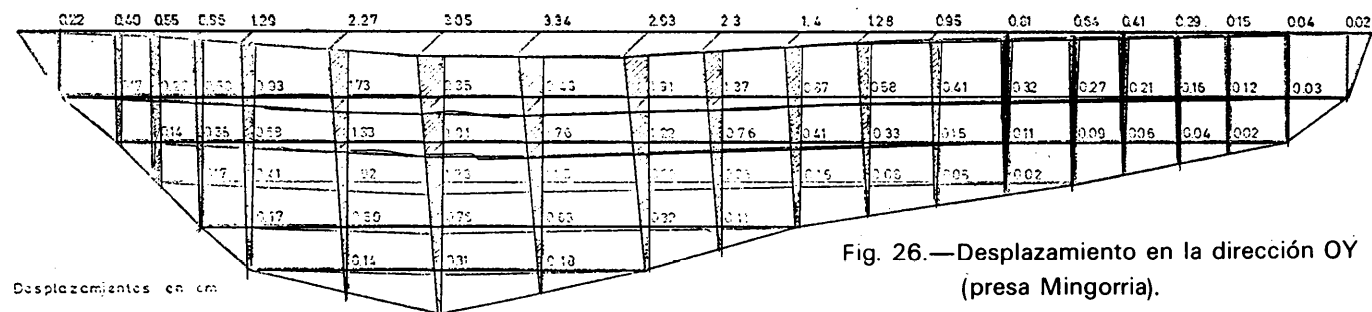


Fig. 26.—Desplazamiento en la dirección OY (presa Mingorria).

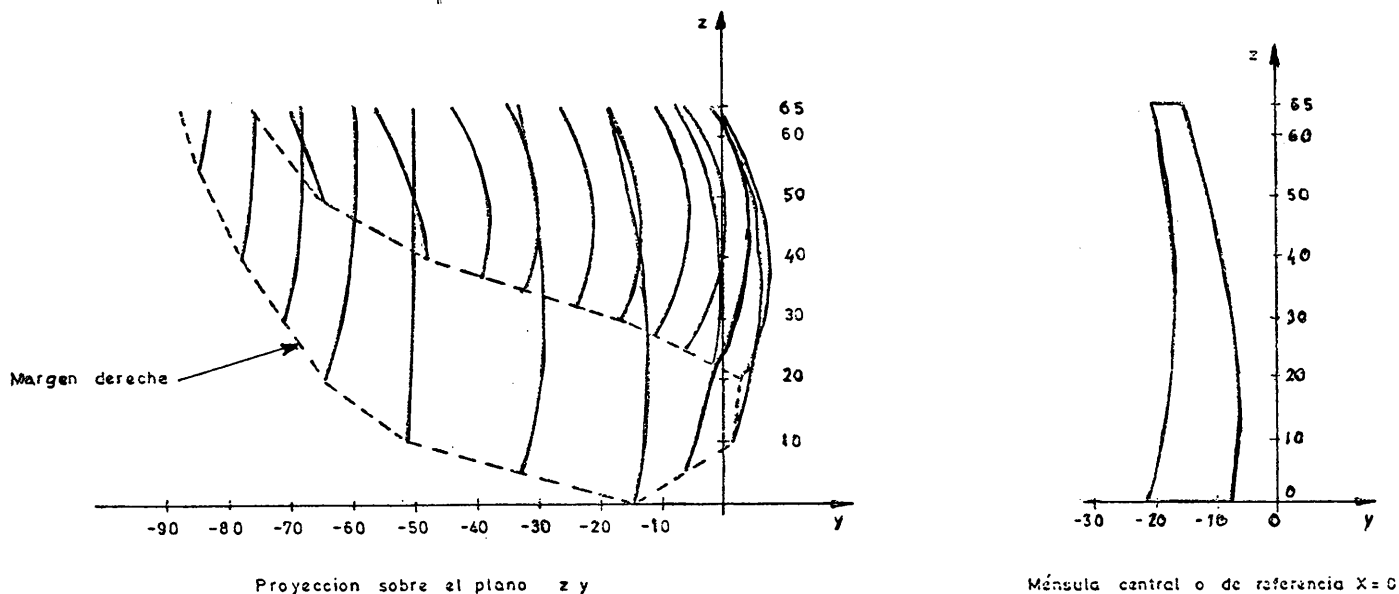


Fig. 27.—Forma de diseño de la solución adoptada en la presa de Mingorria.

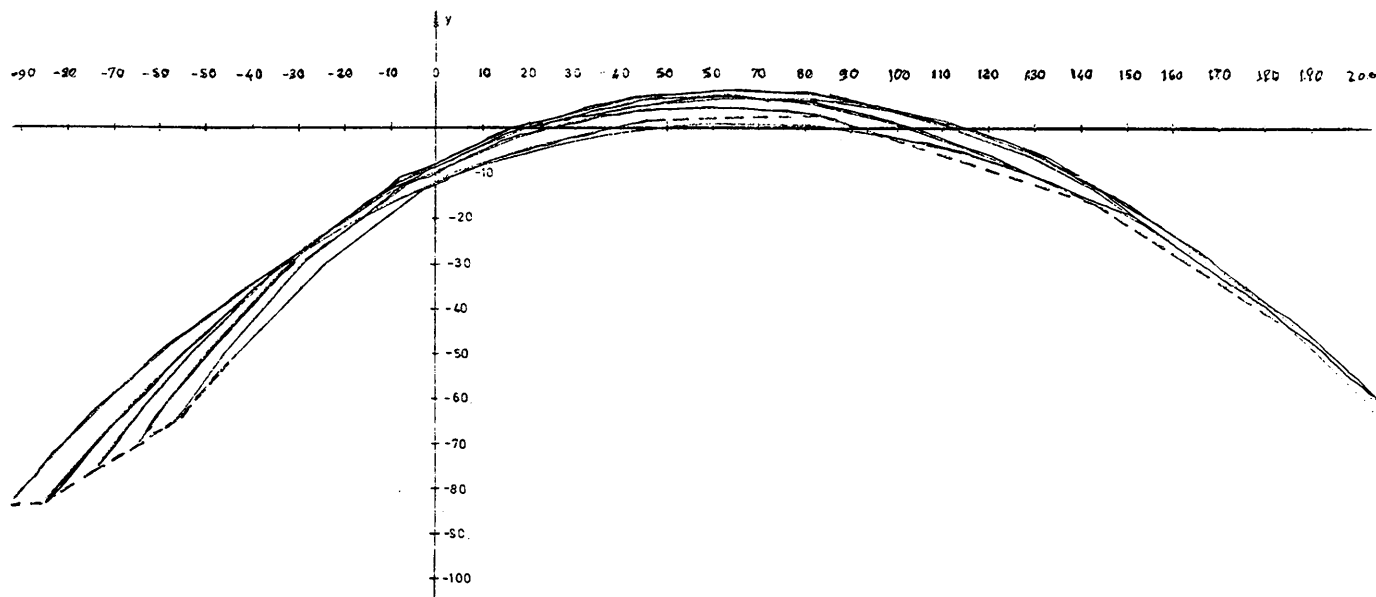


Fig. 28.—Forma de diseño de la solución adoptada. Proyección sobre el plano yx (arcos). Presa de Mingorria.

Se han considerado:

$$e_m = 1.500 \text{ t/m}^2.$$

$$E_m = 2.000 \text{ t/m}^2.$$

4. Parámetros de convergencia geométrica, α y λ .

En el caso que se trata ahora, la situación inicial de la membrana es una superficie poliédrica. La intersección de esta superficie con planos $x = \text{cte}$, muestra que la inclinación media es muy variable (figura 24). Por lo tanto, se ha preferido introducir como superficie inicial, en la

segunda iteración de convergencia geométrica, una superficie más cercana a la superficie final, de modo que con el proceso iterativo propuesto se cumplan las restricciones geométricas referentes a la altura de la presa en pocas iteraciones. Después de una serie de pruebas, se adoptaron como parámetros de convergencia geométrica:

$$\alpha = 0,06.$$

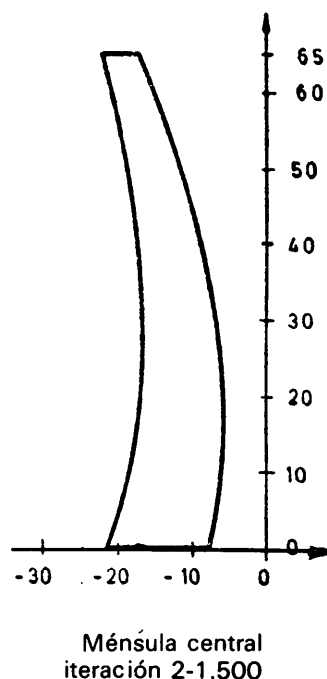
$$\lambda = 11.$$

La convergencia se logra en la segunda iteración.

SOLUCION ADOPTADA

Después de realizar dos iteraciones se considera que la correspondiente a la segunda es una solución posible a factible.

Parámetros de diseño	Ley de espesores (m.)		$5 + 0,1333 z + 0,000067$
	Pretensión PSX (t/m ²)		200
	Pretensión PSy (t/m ²)		200
	Módulo de elasticidad (t/m ²)		1.500
Comportamiento de la forma de diseño	Peso propio actuando sobre lámina	σ_{\max} (t/m ²)	312
		σ_{\min} (t/m ²)	159
	Peso propio actuando sobre ménsula	σ_{\max} (t/m ²)	350
		σ_{\min} (t/m ²)	82
Función mérito	Volumen de hormigón (m ³)		$1 \cdot 489 \cdot 10^5$



BIBLIOGRAFIA

1. SHARPE, R.: «The analysis and optimun design of arch dams». P. H. University of Southampton.
2. DIEZ-CASCON, J.; SAMARTIN, A., y DIAZ DEL VALLE, J.: «Una contribución del diseño asistido mediante computador de presas bóveda». A. E. 82-4 E.T.S. Caminos, Canales y Puertos de Santander.
3. LOBO FIALHO, J. F.: «Principios orientadores do proyecto de barragens abobada». L.N.E.C. Lisboa (1955).
4. SMITH, P.: «A numerical formulation for the nonli-
near theory of membrane Shells». P.h. University of California, Berkeley.
5. CLOUGH, R. W.: «A computer program for static and dynamic analysis of arch dams». Bureau of Reclamation (1973).
6. «Design of arch dams». Bureau of Reclamation. Denver, Colorado (1977).
7. «Arch dam analysis by the finite element method». Division of Structural Mechanics, Technical University of Norway. Trondheim (1968).
8. «La presa bóveda de Susqueda». Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento (1972).